**文章编号**:1000-4939(2023)02-0414-09

# 特高压主变压器随机地震响应敏感性分析

崔佳伟,车爱兰

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,200040 上海)

**摘 要**:通过敏感性分析找出对特高压变电站主变压器随机地震动响应影响较大的参数,能够为抗震设计和后续的地震易损性分析提供借鉴和参考。本研究基于 SAP2000 对主变压器进行有限元模型构建与地震响应计算,分别以互信息法和偏秩相关法对参数进行了敏感性分析。结果表明:两种分析方法得到的参数敏感性排序相同,PGA 是对特高压主变压器随机地震响应影响最大的参数,高压套管长度 $H_1$、高压套管密度 $D_c$、法兰截面等效刚度系数 $F_r$、本体重 $B_w$ 和输入方向也具有一定的影响,而其他的参数对于主变压器随机地震响应的影响较小。

**关键词**:主变压器;地震响应;敏感性分析;互信息法;偏秩相关法

**中图分类号**:U224.2+2 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.019

# Sensitivity analysis of random seismic response of main transformer in substation

CUI Jiawei, CHE Ailan

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 200040 Shanghai, China)

**Abstract**: Through the sensitivity analysis, the parameters which have great influence on the random seismic response of the main transformer are found, which can provide reference for seismic design and subsequent seismic vulnerability analysis. In this paper, based on SAP2000, the finite element model of the main transformer is constructed and the seismic response is calculated. The sensitivity of the parameters is analyzed by mutual information method and partial rank correlation method respectively. The results show that the order of sensitivity of the parameters obtained by the two methods is the same, PGA is the most influential parameter on the random seismic response of the main transformer, and the length of high voltage bushing $H_1$, density of high voltage bushing $D_c$, equivalent stiffness coefficient of flange section $F_r$, intrinsic weight $B_w$ and input direction also have a certain influence, while other parameters have little influence on the random seismic response of the main transformer.

**Key words**: main transformer; seismic response; stepwise regression method; mutual information; partial rank correlation method

**收稿日期**:2021-12-04 **修回日期**:2022-04-29
**基金项目**:国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFC0809400)
**通信作者**:车爱兰,博士生导师,研究员。E-mail: alche@sjtu.edu.cn
**引用格式**:崔佳伟,车爱兰. 特高压主变压器随机地震响应敏感性分析[J]. 应用力学学报,2023,40(2):414-422.
CUI Jiawei, CHE Ailan. Sensitivity analysis of random seismic response of main transformer in substation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):414-422.

电力系统是国家、社会和经济的主要生命线工程之一,对电力系统的破坏会造成不可预测的损失[1]。变电站作为电力系统的枢纽,其安全性尤为重要。近年来,由于特高压输电技术、新能源输电和西电工程等的发展,变电站的电压等级越来越高,数量越来越多,形式越来越多样。同时,随着电压等级的提升,变电站电力设施的地震危险性逐渐增大,尤其是具有主要功能的主变压器,破坏之后造成的损失也会越来越严重[2]。由此,开展变电站电力设施的地震研究具有重要的意义[3]。

主变压器(generator step-up transformer,GSU)是变电站内主要用于输变电的总降压变压器,也是变电站的核心部分,是保证电力系统安全稳定运行的关键设备[4]。一旦发生故障,将造成重大损失,特别是在地震的情况下。近年来,地震对主变压器造成损坏的事件屡屡发生。如图 1 所示,在 2008 年汶川地震中,数十座变电站的主变压器遭受了不同程度的破坏和冲击[5]。因此,主变压器的地震响应特性分析是十分必要的,明确其地震响应规律,探究结构、地震参数对于其地震响应的敏感性程度,对于主变压器的抗震设计、地震损伤预测、地震易损性分析和震后加固与维修具有重大的参考意义[6]。




图 1　汶川地震中主变压器套管破坏情况

Fig. 1　Damage of main transformer bushing in Wenchuan earthquake

目前,许多学者已经在结构的地震响应特性和敏感性分析方法及主变压器的抗震性能两方面开展了相关研究。例如,GILANI 等[7]通过振动台试验研究了 196 kV 及 230 kV 变压器瓷套管的抗震性能;任冠雄等[8]对变压器及套管在普通和中等抗震能力水平下进行了振动台模拟地震试验,得到了试验对象关键部位的加速度、位移及应变等地震响应时程曲线;谢强等[9]分析了汶川地震后大型变压器、开关设备、支撑式管母线的震害机理。张继琪等[10]通过振动台试验分析了隧道的存在和隧道的位置对边坡地震动力响应特性的影响,研究的结果对于连拱隧道边坡抗震设计有一定的借鉴意义,但考虑的因素过少。安利强等[11]分析了基础结构、混凝土材料、配筋、基础施工、外界环境等随机变量对输电铁塔基础耐久性可靠度的敏感性,结果可为基础耐久性设计提供指导。可以看出,关于结构地震动力响应特性和敏感性分析的方法已有研究,但对于主变压器的地震研究集中于动力特性分析和易损性分析。随着电网技术的发展以及特高压输电技术的应用,主变压器的地震动力学问题越来越复杂,且影响因素较多,研究其地震响应内在规律,探究结构、地震参数对于其地震响应的敏感性程度很有必要[12]。

本研究基于互信息法和偏秩相关法对特高压主变压器的随机地震动响应进行了参数敏感性分析。首先,分析主变压器的结构特性、震损特性,总结其相关的地震响应参数和取值范围,评估关键震损评价指标;其次,通过拉丁超立方抽样形成不同的参数组合,并构建有限元模型进行地震时程分析,提取关键部位地震响应值;之后, 通过互信息法和偏秩相关法对参数进行参数敏感性分析; 最后, 对比两种方法的分析结果, 得出对特高压主变压器随机地震响应影响较大的参数, 总结地震响应特性的内在规律。

# 1　方法与原理

## 1.1　敏感性分析

敏感性分析的原理是通过全部参数在取值范围内的随机抽样形成一系列的输入数组带入模型得到一系列的输出再进行分析[13]。一般敏感性分析方法有两种,分别是局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性分析不能考虑到参数之间的交互作用对模型输出的贡献;全局敏感性分析方法能够考虑参数之间的联合效应对输出的影响,结果稳定可靠[14]。常用的敏感性分析方法有,基于修正的 Morris 筛选法、互信息法、偏相关法、基于 SOBOL 的指数法、逐步回归法和偏秩相关法等[15-16]。其中,互信息法和偏秩相关法都是全局敏感性分析方法,对参数的概率分布无特殊要求,适合特高压主变压器随机地震响应这种参数众多而且非线性的分析。本研究的敏感性分析流程见图 2。

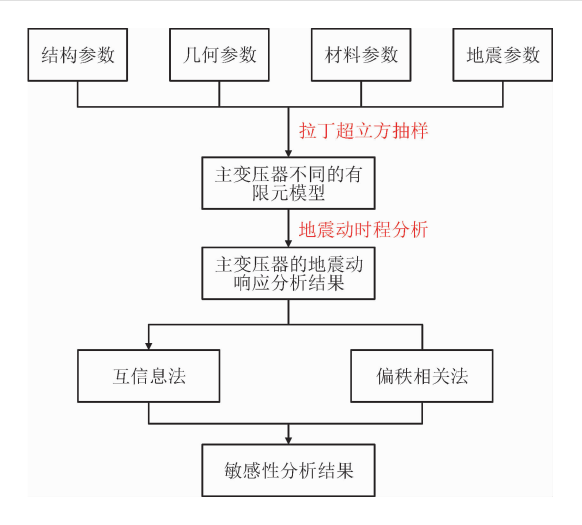



图 2 敏感性分析流程

Fig. 2 Sensitivity analysis process

## 1.2 互信息法

### 1.2.1 信息熵

信息熵是描述一个事件无序程度的度量。一个事件的无序程度越大,包含的信息也就越多,信息熵越大[17]。信息熵的公式为

$$H(x) = -\sum_{i}^{n} p(x_i)\log p(x_i) \tag{1}$$

其中:$H(x)$为随机事件 $X$ 的信息熵;$p(x_i)$表示随机事件 $X$ 为 $x_i$的概率。

### 1.2.2 互信息

互信息是两个事件所共有的信息量的度量。定义两个随机事件 $X$、$Y$ 的互信息为

$$I(x,y) = \sum_{y\in Y}\sum_{x\in X} p(x,y)\log\left(\frac{p(x,y)}{p(x)p(y)}\right) \tag{2}$$

其中:$p(x)$为随机事件 $X$ 发生 $x$ 时的概率;$p(y)$为随机事件 $Y$ 发生 $y$ 时的概率;$p(x,y)$为随机事件 $X$ 和 $Y$ 的联合概率;则 $I(x,y)$为两个随机事件的互信息。

互信息和信息熵的关系如图 3 所示。

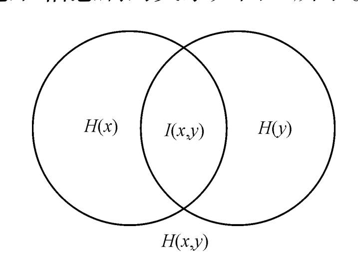



图 3 互信息和信息熵的关系

Fig. 3 The relationship between mutual information and information entropy

如果随机事件 $X$、$Y$ 相互独立,则 $I(x,y)=0$;如果随机事件 $X$、$Y$ 完全相关,则 $I(x,y)=0.5[H(x)+H(y)]$。$U$ 和 $R$ 是用来衡量互信息量度的两个指标,如下。

$$U(x,y) = 2\left[\frac{I(x,y)}{H(x)+H(y)}\right] \tag{3}$$

$$R(x,y) = [1-\exp[-2I(x,y)]]^{1/2} \tag{4}$$

其中:$U$ 和 $R$ 的值越大,说明随机事件 $X$、$Y$ 之间的相关性越强;同理,$X$ 如果为输入变量,$Y$ 为输出变量,$U$ 和 $R$ 的值越大,说明该输入变量与输出变量相关性越高,则该输入变量的敏感性越强。

## 1.3 偏秩相关法

偏秩相关法是一种利用"等级位差"来进行分析的全局敏感性分析方法,适用条件为各参数有相同维度的随机变化[18]。首先要计算各参数的秩相关系数,通过抽样方法生成 $n$ 维自变量 $X_1,X_2,X_3,\cdots,X_m$,带入模型得到 $n$ 维输出变量 $Y$,则组成的输入、输出变量矩阵为

$$\boldsymbol{Z} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nn} \end{pmatrix} \tag{5}$$

变量 $Y,X_1,X_2,X_3,\cdots,X_m$中,任意两个变量之间的秩相关系数为

$$r_{YX_m}/r_{X_kX_m}/r_{X_mY} = \frac{6\sum_{i=1}^{n}(R_i-Q_i)^2}{n^3-n} \tag{6}$$

其中:$R_i$为 $n$ 维变量 $Y/X_k$中第 $i$ 个变量的秩(该变量在 $n$ 维变量从大到小排序后所在的位次);$Q_i$为 $n$ 维变量 $X_m$中第 $i$ 个变量的秩。

则得到这些输入、输出变量间的秩相关系数矩阵 $\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{P}$ 的逆矩阵 $\boldsymbol{C}$ 为

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1-R_{X_1}^2} & C_{12} & \cdots & C_{1m} & \frac{-B_1}{1-R_Y^2} \\ C_{21} & \frac{1}{1-R_{X_2}^2} & \cdots & C_{2m} & \frac{-B_2}{1-R_Y^2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & \frac{1}{1-R_{X_m}^2} & \frac{-B_m}{1-R_Y^2} \\ \frac{-B_1}{1-R_Y^2} & \frac{-B_2}{1-R_Y^2} & \cdots & \frac{-B_m}{1-R_Y^2} & \frac{1}{1-R_Y^2} \end{pmatrix},$$

$$P = \begin{pmatrix} 1 & r_{X_1X_2} & \cdots & r_{X_1X_k} & r_{X_1Y} \\ r_{X_2X_1} & 1 & \cdots & r_{X_2X_K} & r_{X_2Y} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{X_kX_1} & r_{X_kX_2} & \cdots & 1 & r_{X_kY} \\ r_{YX_1} & r_{YX_2} & \cdots & r_{YX_k} & 1 \end{pmatrix} \tag{7}$$

其中：$B_i$为第 $i$ 维输入、输出变量 $Y, X_1, X_2, X_3, \cdots, X_m$ 组成的回归方程的标准回归系数；$R_Y^2$ 表示 $Y$ 为回归方程中的因变量时，它的可决指数；$R_{X_i}^2$ 表示 $X_i$为回归方程中的因变量时，它的可决指数；可决指数是回归方程拟合效果的判别因子。由此，可根据式(7)计算输入变量 $X_i$与输出变量 $Y$ 之间的偏秩相关系数 $P_{X_i}$ 为

$$P_{X_i} = B_i \left( \frac{1 - R_{X_i}^2}{1 - R_Y^2} \right)^{1/2} \tag{8}$$

其中：偏秩相关系数 $|P_{X_i}|$ 的值越大，说明该参数的敏感性越大，即对模型输出的影响程度越大；$P_{X_i}$ 的符号代表该参数与输出变量之间的正、负相关关系。

### 1.4　抽样方法

敏感性分析是基于统计学的一种数据分析方法，在结构的缺陷、可靠性分析等领域得到了广泛应用[19-20]。该方法首先在变量的取值区间内对其进行抽样，得到一系列的数据样本。拉丁超立方抽样是一种多维分层的随机抽样方法，它能使抽样的数据样本在取值空间内按照概率密度分布规律均匀的分布，工作原理如下：首先确定参数的抽样数目 $N$；其次把参数的取值区间等概率的分为 $N$ 个间隔，$\chi_0 < \chi_1 < \chi_2 < \chi_3 < \cdots < \chi_n < \cdots < \chi_N$，且 $p(x_n < x < x_{n+1}) = 1/N$；最后在每一个间隔中随机抽取一个样本，共抽出 $N$ 个样本。

## 2　主变压器随机地震动响应分析

### 2.1　特高压主变压器结构

主变压器是变电站中主要用于输变电的总降压变压器。为了满足特高压的输电需求，其主要的结构与低等级变压器略有不同。特高压主变压器主要由主体组成：内带铁芯和线圈组件的油箱、节油、转塔、高压套管、中压套管、低压套管。主体是一个装满变压器油的油箱，其中包含 1 个铁芯和绕组。3 种套管固定在罐顶或侧板升降座上。套管采用陶瓷材料制成，两端有金属法兰，如图 4 所示。

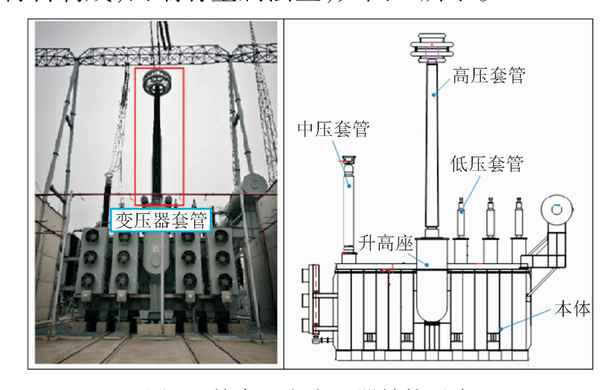



图 4　特高压主变压器结构示意

Fig. 4　Structure of main transformer

虽然不同的主变压器有差异，但在类型上较为统一，在进行有限元计算之前，需要对模型进行一定的简化。考虑到主变压器的结构特征和相关的震损评估经验，由于套管相对本体较高且细长，套管顶部会出现较大的相对位移，套管根部会出现应力集中的现象导致折断；本体重量较大，在地震中会发生倾覆和滑移。据此，简化主变压器的结构形式为：本体、升高座、套管和上部配重 4 部分。

与主变压器地震响应有关的参数可以分为结构参数、几何参数、材料参数和地震参数 4 种类型。在选取参数时，应充分考虑主变压器的结构特性、震损特性和地震的随机性。本研究基于现场调研和《国家电网输变电工程总体设计》提供的数据，总结了如表 1 所示的主变压器地震响应参数集。对于地震动参数，反应谱加速度的概率分布不成熟。因此，本研究采用 PGA 和输入方向作为地震动的随机参数。

**表 1　主变压器的地震动响应参数集**

Tab. 1　Seismic response parameter set of main transformer

| 编号 | 类型 | 参数 | 概率分布 | 取值 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 几何参数 | 本体长 $B_l$/m | 均匀 | 5 ~ 8 |
| 2 | | 本体宽 $B_w$/m | 均匀 | 2 ~ 3.3 |
| 3 | | 本体高 $B_h$/m | 均匀 | 2.5 ~ 3.8 |
| 4 | | 本体重 $B_m$/t | 均匀 | 250 ~ 350 |
| 5 | | 高压套管长度 $H_l$/m | 均匀 | 7 ~ 10 |
| 6 | | 高压套管外径 $H_d$/m | 均匀 | 0.4 ~ 0.6 |
| 7 | | 高压套管壁厚 $H_w$/m | 均匀 | 0.04 ~ 0.06 |
| 8 | 材料参数 | 高压套管弹性模量 $E_c$/GPa | 均匀 | 90 ~ 110 |
| 9 | | 高压套管密度 $D_c$/(kg·m$^{-3}$) | 均匀 | 1 066 ~ 3 350 |
| 10 | 结构参数 | 法兰截面等效刚度系数 $F_r$ | 均匀 | 0.5 ~ 0.8 |
| 11 | | 中压套管比例 $M_r$ | 均匀 | 0.3 ~ 0.5 |
| 12 | 地震参数 | 输入方向 $\alpha$ /rad | 均匀 | 0 ~ 2π |
| 13 | | PGA/$g$ | 对数正态 | $\mu = -1.16$, $\sigma = 0.67$ |

## 2.2 主变压器的地震响应分析

结构分析软件 SAP2000 的开源接口允许程序参数化建模与计算，能够实现大量有限元模型的构建与仿真。图 5 为特高压主变压器的有限元模型，采用杆单元体系，模态阻尼比为 5%。

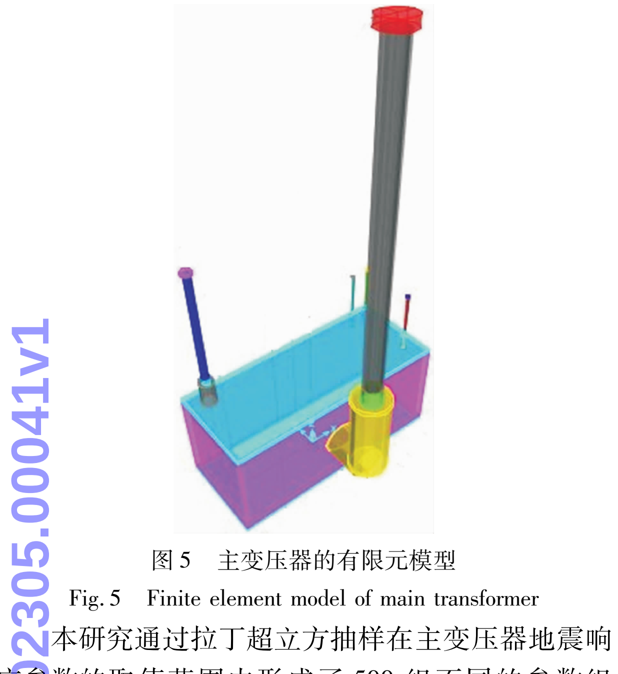


图 5 主变压器的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of main transformer

本研究通过拉丁超立方抽样在主变压器地震响应参数的取值范围内形成了 500 组不同的参数组合，并进行地震动响应计算，其中符合要求的地震波通过 PEER 强震数据库搜寻，地震参数的选取包括地震分组、场地条件、地震影响系数和卓越频率参考《变电站（换流站）抗震安全风险评估导则》。图 6 展示了这些地震波的加速度反应谱。基于主变压器的结构特性和震损特性，本体的滑移、倾覆和套管的开裂与折断是主要的失效模式，由此以高压套管顶部位移 $U_g$(mm)、高压套管根部应力 $S_g$(MPa) 和本体顶部位移 $U_b$(mm) 为动力特性指标。由于篇幅限制，表 2 和表 3 展示了部分抽样结果与计算结果。图 7 为部分工况的主变压器最大剪应力响应和最大位移响应结果。

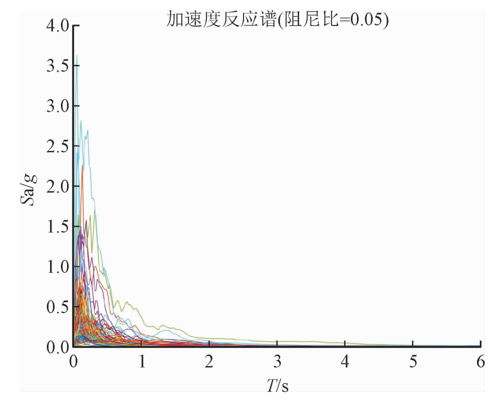



图 6 地震波的加速度反应谱

Fig. 6 The acceleration response spectrum curves of seismic waves

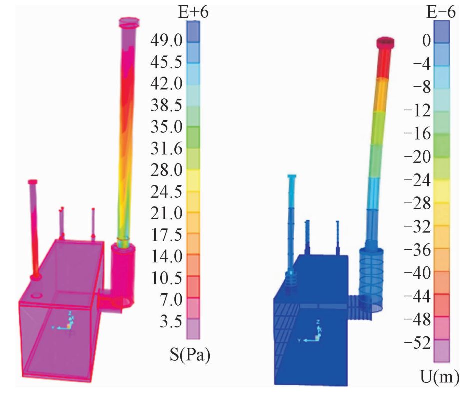



图 7 主变压器地震响应结果($PGA = 0.69g$)

Fig. 7 Seismic response of main transformer ($PGA = 0.69g$)

**表 2 部分主变压器地震响应参数的抽样结果**

Tab. 2 Sampling results of seismic response parameters of some main transformers

| $B_l$ | $B_w$ | $B_h$ | $B_m$ | $D_c$ | $E_c$ | $H_l$ | $H_d$ | $H_w$ | $F_r$ | $M_r$ | $\alpha$ | PGA | $U_g$ | $S_g$ | $U_b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.81 | 3.20 | 3.29 | 335.6 | 2 331.3 | 50.79 | 7.54 | 0.53 | 0.060 | 0.57 | 0.40 | 5.48 | 0.47 | 58.1 | 50.79 | 7.54 |
| 6.80 | 3.28 | 3.75 | 340.9 | 3 173.4 | 37.56 | 7.05 | 0.40 | 0.043 | 0.70 | 0.46 | 4.81 | 0.96 | 6.80 | 37.56 | 7.05 |
| 6.30 | 2.11 | 2.59 | 311.6 | 2 741.9 | 59.97 | 9.22 | 0.56 | 0.055 | 0.58 | 0.41 | 4.90 | 0.81 | 6.30 | 59.97 | 9.22 |
| 7.75 | 2.49 | 3.27 | 250.6 | 1 924.9 | 41.12 | 9.37 | 0.47 | 0.055 | 0.75 | 0.35 | 3.94 | 0.91 | 7.75 | 41.12 | 9.37 |
| 7.91 | 2.40 | 3.17 | 325.9 | 1 186.8 | 35.39 | 7.39 | 0.55 | 0.053 | 0.60 | 0.45 | 5.36 | 1.36 | 7.91 | 35.39 | 7.39 |
| 7.17 | 2.03 | 3.49 | 257.7 | 3 342.4 | 55.79 | 7.25 | 0.47 | 0.040 | 0.68 | 0.34 | 5.42 | 0.22 | 7.17 | 55.79 | 7.25 |
| 6.51 | 2.74 | 2.57 | 316.4 | 1 695.2 | 52.48 | 7.43 | 0.49 | 0.047 | 0.72 | 0.38 | 0.03 | 1.04 | 6.51 | 52.48 | 7.43 |
| 7.51 | 2.36 | 3.59 | 290.6 | 2 692.4 | 30.94 | 8.88 | 0.46 | 0.044 | 0.56 | 0.47 | 0.68 | 0.75 | 7.51 | 30.94 | 8.88 |
| 6.43 | 2.73 | 3.09 | 297.7 | 1 897.8 | 57.13 | 8.75 | 0.43 | 0.044 | 0.73 | 0.31 | 5.96 | 0.40 | 6.43 | 57.13 | 8.75 |
| 5.50 | 3.10 | 2.98 | 283.5 | 2 579.4 | 42.55 | 9.43 | 0.42 | 0.049 | 0.54 | 0.42 | 5.87 | 0.64 | 5.50 | 42.55 | 9.43 |

表 3　互信息法的分析结果

Tab. 3　Analysis results of mutual information method

| 序号 | $U_g$ | | | | $S_g$ | | | | $U_m$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 参数类型 | 参数名 | $U$ | $R$ | 参数类型 | 参数名 | $U$ | $R$ | 参数类型 | 参数名 | $U$ | $R$ |
| 1 | 地震 | PGA | 0.774 6 | 1.925 5 | 地震 | PGA | 0.726 9 | 1.810 8 | 地震 | PGA | 1.042 3 | 2.653 6 |
| 2 | 几何 | $H_l$ | 0.168 3 | 0.534 5 | 几何 | $H_l$ | 0.194 9 | 0.568 2 | 地震 | $\alpha$ | 0.125 7 | 0.471 5 |
| 3 | 材料 | $D_c$ | 0.161 9 | 0.525 9 | 材料 | $D_c$ | 0.190 8 | 0.563 3 | 几何 | $B_m$ | 0.110 6 | 0.445 4 |
| 4 | 结构 | $F_r$ | 0.145 5 | 0.502 5 | 结构 | $F_r$ | 0.148 2 | 0.506 5 | 材料 | $D_c$ | 0.109 4 | 0.443 3 |
| 5 | 几何 | $B_h$ | 0.136 4 | 0.488 6 | 材料 | $E_c$ | 0.143 4 | 0.499 4 | 几何 | $H_l$ | 0.108 4 | 0.441 5 |
| 6 | 几何 | $B_w$ | 0.132 9 | 0.483 1 | 几何 | $H_w$ | 0.122 8 | 0.466 7 | 几何 | $B_h$ | 0.106 9 | 0.438 8 |
| 7 | 几何 | $H_d$ | 0.127 5 | 0.474 4 | 几何 | $H_d$ | 0.119 8 | 0.461 5 | 几何 | $B_w$ | 0.105 5 | 0.436 1 |
| 8 | 几何 | $H_w$ | 0.126 1 | 0.472 2 | 几何 | $B_h$ | 0.119 0 | 0.460 2 | 几何 | $B_l$ | 0.096 3 | 0.418 5 |
| 9 | 几何 | $B_l$ | 0.122 7 | 0.466 5 | 地震 | $\alpha$ | 0.117 1 | 0.456 9 | 几何 | $H_w$ | 0.094 5 | 0.416 8 |
| 10 | 材料 | $E_c$ | 0.122 6 | 0.466 3 | 几何 | $B_l$ | 0.114 1 | 0.451 7 | 几何 | $H_d$ | 0.090 2 | 0.406 2 |
| 11 | 几何 | $B_m$ | 0.115 3 | 0.453 8 | 几何 | $B_w$ | 0.113 4 | 0.450 5 | 结构 | $M_r$ | 0.087 8 | 0.401 3 |
| 12 | 地震 | $\alpha$ | 0.112 0 | 0.448 0 | 几何 | $B_m$ | 0.108 2 | 0.441 2 | 结构 | $F_r$ | 0.083 1 | 0.391 4 |
| 13 | 结构 | $M_r$ | 0.102 7 | 0.430 9 | 结构 | $M_r$ | 0.097 6 | 0.421 1 | 材料 | $E_c$ | 0.083 1 | 0.391 4 |

## 3　敏感性分析结果

基于特高压主变压器的随机地震动响应结果，以表 1 所示抽样的 500 组参数为输入变量，以相应计算得到 3 个 500 组地震响应（高压套管顶部位移 $U_g$、高压套管根部应力 $S_g$和本体顶部位移 $U_b$）为输出变量。之后，再将输入、输出变量组成 3 个 500 × 14 的矩阵，应用互信息法和偏秩相关法法进行参数的敏感性分析。

### 3.1　互信息法分析结果

利用 Matlab 实现逐步回归法的基本程序，之后对输入、输出的变量矩阵进行敏感性分析，结果如表 3 所示。可以看出：对于高压套管顶部位移 $U_g$来说，PGA 是敏感性最高的参数且远高于其他参数，中压套管比例 $M_r$是敏感性最低的参数，其余参数的敏感性相差不大。前 8 位排序为 PGA > 高压套管长度 $H_l$ > 高压套管密度 $D_c$ > 法兰截面等效刚度系数 $F_r$ > 本体高 $B_h$ > 本体宽 $B_w$ > 高压套管外径 $H_d$ > 高压套管壁厚 $H_w$。PGA 是主要的地震强度指标，当它改变时对结构的动力响应的影响一定是最大的，本体高 $B_h$和高压套管长度 $H_l$的增加会增大结构的细长比，引起套管更剧烈的摇晃，套管密度 $D_c$和法兰截面等效刚度系数 $F_r$都是通过影响套管的力学性能进一步影响其位移，而中压套管比例 $M_r$的改变显然与高压套管的力学性能无关，所以其敏感性较低。

对于高压套管根部应力 $S_g$来说，PGA 是敏感性最高的参数且远高于其他参数，中压套管比例 $M_r$是敏感性最低的参数，其余参数的敏感性相差不大。前 8 位排序为 PGA > 高压套管长度 $H_l$ > 高压套管密度 $D_c$ > 法兰截面等效刚度系数 $F_r$ > 套管的弹性模量 $E_c$ > 高压套管壁厚 $H_w$ > 高压套管外径 $H_d$ > 本体高 $B_h$。高压套管长度 $H_l$、套管密度 $D_c$、法兰截面等效刚度系数 $F_r$、套管的弹性模量 $E_c$、高压套管壁厚 $H_w$和高压套管外径 $H_d$都是通过影响套管本身的性能从而影响了其应力，而中压套管比例 $M_r$的改变与高压套管无关，所以其敏感性较低。

对于本体顶部位移 $U_m$来说，PGA 是敏感性最高的参数且远高于其他参数，套管的弹性模量 $E_c$是敏感性最低的参数，前 8 位排序为 PGA > 输入方向 $\alpha$ > 本体重 $B_m$ > 本体高 $B_h$ >  套管密度 $D_c$ > 高压套管长度 $H_l$ > 本体宽 $B_w$ > 本体长 $B_l$。由于本体存在一定的长宽比导致输入方向 $\alpha$ 的改变对本体的位移有影响；本体重 $B_m$的增加会减小本体在地震中的惯性力从而影响到本体的位移；套管密度 $D_c$和高压套管长度 $H_l$的变化会改变本体承重的重量；由于本体的刚度较大，本体的长宽对于本体整体的位移的影响较小；显然套管的弹性模量 $E_c$的变化对于本体无影响，所以其敏感性较低。

### 3.2 偏秩相关法分析结果

利用 Matlab 程序实现偏秩相关法的基本程序，将 500 组输入、输出数据带入程序进行敏感性分析，得到如表 4 所示的分析结果。

对于高压套管顶部位移 $U_g$来说，PGA 是敏感性最高的参数，|$P$|值达到了 0.700，中压套管比例 $M_r$是敏感性最低的参数，其余参数的排序为高压套管长度 $H_l$ > 高压套管密度 $D_c$ > 法兰截面等效刚度系数 $F_r$ > 本体高 $B_h$ > 本体宽 $B_w$ > 高压套管外径 $H_d$ > 高压套管壁厚 $H_w$ > 本体长 $B_l$ > 套管弹性模量 $E_c$ > 本体重 $B_m$ > 输入方向 $\alpha$。

对于高压套管根部应力 $S_g$来说，PGA 是敏感性最高的参数，|$P$|值达到了 0.778，中压套管比例 $M_r$是敏感性最低的参数，其余参数的排序为高压套管长度 $H_l$ > 高压套管密度 $D_c$ > 法兰截面等效刚度系数 $F_r$ > 套管弹性模量 $E_c$ > 高压套管壁厚 $H_w$ > 高压套管外径 $H_d$ > 本体高 $B_h$ > 输入方向 $\alpha$ > 本体宽 $B_w$ 本体长 $B_l$ > 本体重 $B_m$。

对于本体顶部位移 $U_m$来说，PGA 是敏感性最高的参数，|$P$|值达到了 0.823，套管弹性模量 $E_c$是敏感性最低的参数，其余参数的排序为输入方向 $\alpha$ > 本体重 $B_m$ > 高压套管密度 $D_c$ > 高压套管长度 $H_l$ > 本体高 $B_h$ > 本体宽 $B_w$ > 本体长 $B_l$ > 高压套管壁厚 $H_w$ > 高压套管外径 $H_d$ > 中压套管比例 $M_r$ > 法兰截面等效刚度系数 $F_r$。

表 4 偏秩相关法分析结果

Tab. 4 The results analyzed by partial rank correlation

| 序号 | $U_g$ | | | $S_g$ | | | $U_m$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 参数类型 | 参数名 | \|$P$\| | 参数类型 | 参数名 | \|$P$\| | 参数类型 | 参数名 | \|$P$\| |
| 1 | 地震 | PGA | 0.700 | 地震 | PGA | 0.778 | 地震 | PGA | 0.823 |
| 2 | 几何 | $H_l$ | 0.388 | 几何 | $H_l$ | 0.287 | 地震 | $\alpha$ | 0.200 |
| 3 | 材料 | $D_c$ | 0.204 | 材料 | $D_c$ | 0.227 | 几何 | $B_m$ | 0.170 |
| 4 | 结构 | $F_r$ | 0.164 | 结构 | $F_r$ | 0.154 | 材料 | $D_c$ | 0.159 |
| 5 | 几何 | $B_h$ | 0.150 | 材料 | $E_c$ | 0.144 | 几何 | $H_l$ | 0.154 |
| 6 | 几何 | $B_w$ | 0.097 | 几何 | $H_w$ | 0.085 | 几何 | $B_h$ | 0.150 |
| 7 | 几何 | $H_d$ | 0.081 | 几何 | $H_d$ | 0.079 | 几何 | $B_w$ | 0.095 |
| 8 | 几何 | $H_w$ | 0.048 | 几何 | $B_h$ | 0.077 | 几何 | $B_l$ | 0.065 |
| 9 | 几何 | $B_l$ | 0.042 | 地震 | $\alpha$ | 0.066 | 几何 | $H_w$ | 0.055 |
| 10 | 材料 | $E_c$ | 0.034 | 几何 | $B_l$ | 0.054 | 几何 | $H_d$ | 0.054 |
| 11 | 几何 | $B_m$ | 0.030 | 几何 | $B_w$ | 0.031 | 结构 | $M_r$ | 0.039 |
| 12 | 地震 | $\alpha$ | 0.016 | 几何 | $B_m$ | 0.015 | 结构 | $F_r$ | 0.023 |
| 13 | 结构 | $M_r$ | 0.002 | 结构 | $M_r$ | 0.009 | 材料 | $E_c$ | 0.022 |



### 3.3 结果对比分析

对比两种敏感性分析方法的结果，见图 8 ~ 10。可以发现，对特高压于主变压器的 3 个地震响应评价指标高压套管顶部位移 $U_g$、高压套管根部应力 $S_g$和本体顶部位移 $U_b$，两种敏感性分析方法得到的参数敏感性排序都是相同的，说明了结果的正确性与合理性。

总体分析每个参数对特高压主变压器整体随机地震响应评价指标的综合影响，将参数在两种方法下的 $U$、$R$ 和|$P$|值进行归一化并相加，结果如图 11 所示。可以看出，PGA 是对主变压器随机地震响应

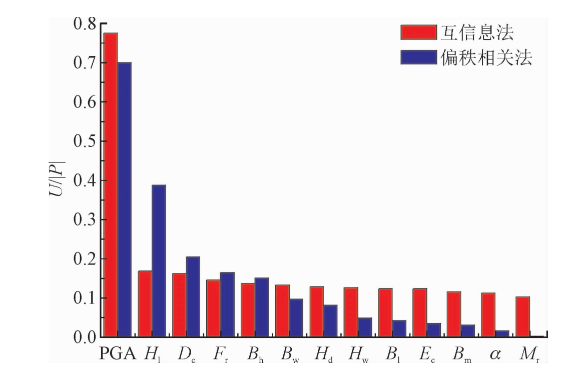



图 8 $U_g$的敏感性分析结果对比

Fig. 8 Comparison of sensitivity analysis results of $U_g$

影响最大的参数，高压套管长度 $H_l$、高压套管密度 $D_c$、法兰截面等效刚度系数 $F_r$、本体重 $B_w$ 和本体高 $B_h$ 也具有一定的影响，而其他的参数对于特高压主变压器随机地震响应的影响较小，在之后抗震设计和地震易损性分析中可以不考虑。

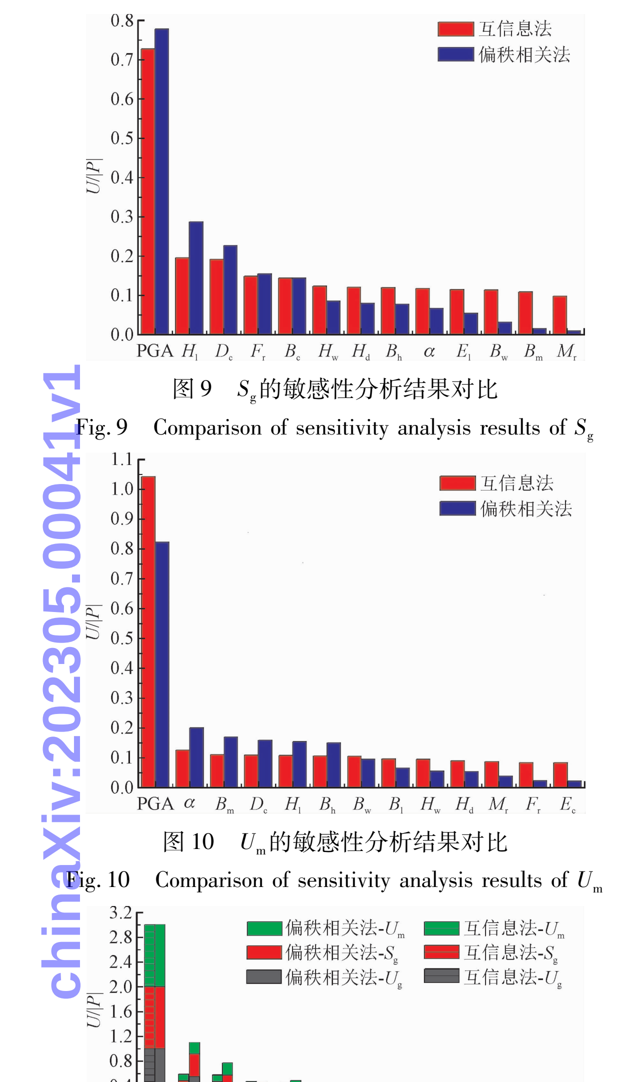



图 9　$S_g$ 的敏感性分析结果对比

Fig. 9　Comparison of sensitivity analysis results of $S_g$

图 10　$U_m$ 的敏感性分析结果对比

Fig. 10　Comparison of sensitivity analysis results of $U_m$

图 11　每个参数对于特高压主变压器整体随机地震响应敏感性

Fig. 11　Sensitivity of each parameter to random seismic response of main transformer

## 4　结　论

特高压主变压器的地震响应随着 PGA、地震输入方向、自身结构、几何、材料等参数的变化而变化，这些因素对于主变压器随机地震响应的影响规律和影响程度都是不同的。本研究通过互信息法和偏秩相关法分析了这些因素的参数敏感性，得到了以下结论。

1）通过两种分析方法得知：PGA 是对特高压主变压器 3 个地震响应指标影响最大的参数，中压套管比例 $M_r$ 对于高压套管顶部位移 $U_g$ 和根部应力 $S_g$ 的影响最小，套管弹性模量 $E_c$ 对于本体顶部位移 $U_m$ 的影响最小；两种方法得到的参数敏感性排序相同，说明了结果的合理性与正确性。

2）综合评估各参数对特高压主变压器的随机地震响应的影响程度可知，PGA 是对主变压器随机地震响应影响最大的参数，高压套管长度 $H_l$、高压套管密度 $D_c$、法兰截面等效刚度系数 $F_r$、本体重 $B_w$ 和输入方向也具有一定的影响，而其他的参数对于主变压器随机地震响应的影响较小。

通过本研究对特高压主变压器影响参数的敏感性分析，精确识别了特高压主变压器随机地震响应的敏感因素，为抗震设计和进一步的地震易损性分析提供了参考和指导。

## 参考文献：

[1]　谢强. 电力系统的地震灾害研究现状与应急响应[J]. 电力建设，2008，29(8)：1-6.
XIE Qiang. State-of-the-art of seismic disaster research and emergency response of electric power system[J]. Electric power construction，2008，29(8)：1-6(in Chinese).

[2]　曹永兴，邓鹤鸣，蔡炜，等. 电力设施应对地震及其次生灾害的研究进展[J]. 高电压技术，2019，45(6)：1962-1974.
CAO Yongxing，DENG Heming，CAI Wei，et al. Research progress in prevention of earthquake and secondary disasters on power facilities[J]. High voltage engineering，2019，45(6)：1962-1974(in Chinese).

[3]　王飞，李正，杨风利，等. 特高压酒杯型铁塔地震反应谱分析[J]. 高电压技术，2018，44(3)：968-975.
WANG Fei，LI Zheng，YANG Fengli，et al. Seismic response spectrum analysis of UHV cup-type steel tower[J]. High voltage engineering，2018，44(3)：968-975(in Chinese).

[4]　韩俊，刘洪，葛少云，等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模[J]. 电力系统自动化，2013，37(7)：42-47.
HAN Jun，LIU Hong，GE Shaoyun，et al. Optimization modeling for contact structure of main transformers between substations with improved power supply capability[J]. Automation of electric power systems，2013，37(7)：42-47(in Chinese).

[5]　程永锋，朱祝兵，卢智成，等. 变电站电气设备抗震研究现状及进展[J]. 建筑结构，2019，49(增刊 2)：356-361.
CHENG Yongfeng，ZHU Zhubing，LU Zhicheng，et al. Research state and development of seismic performance of substation electrical equipment[J]. Building structure，2019，49(S2)：356-361(in

Chinese).

[6] 孙新豪,谢强,李晓璇,等. 带有滑动摩擦摆支座的500 kV变压器地震响应[J]. 高电压技术,2021,47(9):3226-3235.
SUN Xinhao,XIE Qiang,LI Xiaoxuan,et al. Seismic response of a 500 kV transformer with friction pendulum isolation bearing[J]. High voltage engineering,2021,47(9):3226-3235(in Chinese).

[7] GILANI A S,WHITTAKER A S,FENVES G L. Seismic evaluation and retrofit of 230 kV porcelain transformer bushings[J]. Earthquake spectra,2001,17(4):597-616.

[8] 任冠雄,曹枚根,冯国栋,等. 特高压换流站直流场复合绝缘子动力特性测试研究[J]. 高压电器,2020,56(2):77-84.
REN Guanxiong,CAO Meigen,FENG Guodong,et al. Research on dynamic characteristic testing of DC field composite insulator in UHV converter station[J]. High voltage apparatus,2020,56(2):77-84(in Chinese).

[9] 谢强,朱瑞元,周勇,等. 220 kV隔离开关地震模拟振动台试验[J]. 电网技术,2012,36(9):262-267.
XIE Qiang,ZHU Ruiyuan,ZHOU Yong,et al. Shake table test on 220 kV disconnecting switch[J]. Power system technology,2012,36(9):262-267(in Chinese).

[10] 张继琪,江学良,杨慧,等. 含连拱隧道边坡地震响应特性研究[J]. 应用力学学报,2021,38(2):597-606.
ZHANG Jiqi,JIANG Xueliang,YANG Hui,et al. Study on seismic response characteristics of slope with double-arch tunnel[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(2):597-606(in Chinese).

[11] 安利强,杨勃,严福章,等. 盐渍土输电铁塔基础耐久性可靠度敏感性研究[J]. 应用力学学报,2016,33(3):459-465.
AN Liqiang,YANG Bo,YAN Fuzhang,et al. Research on reliability sensitivity of transmission tower foundation durability in saline soil[J]. Chinese journal of applied mechanics,2016,33(3):459-465(in Chinese).

[12] 张玥,薛磊,陈帅,等. 地震作用下高烈度区连续刚构桥参数敏感性分析[J]. 地震工程学报,2020,42(2):311-317.
ZHANG Yue,XUE Lei,CHEN Shuai,et al. Parameter sensitivity analysis of continuous rigid-frame bridges in high seismic intensity regions under seismic action[J]. China earthquake engineering journal,2020,42(2):311-317(in Chinese).

[13] 张质明,王晓燕,李明涛. 基于全局敏感性分析方法的WASP模型不确定性分析[J]. 中国环境科学,2014,34(5):1336-1346.
ZHANG Zhiming,WANG Xiaoyan,LI Mingtao. Uncertainty analysis of WASP based on global sensitivity analysis method[J]. China environmental science,2014,34(5):1336-1346(in Chinese).

[14] ZHAO M H,DONG Y,GUO H Y. Comparative life cycle assessment of composite structures incorporating uncertainty and global sensitivity analysis[J]. Engineering structures,2021,242:112394.

[15] KAPUSUZOGLU B,MAHADEVAN S. Information fusion and machine learning for sensitivity analysis using physics knowledge and experimental data[J]. Reliability engineering & system safety,2021,214:107712.

[16] TSVETKOVA O,OUARDA T B M J. A review of sensitivity analysis practices in wind resource assessment[J]. Energy conversion and management,2021,238:114112.

[17] 赵静翔,牛焕娜,王钰竹. 基于信息熵时段划分的主动配电网动态重构[J]. 电网技术,2017,41(2):402-408.
ZHAO Jingxiang,NIU Huanna,WANG Yuzhu. Dynamic reconfiguration of active distribution network based on information entropy of time intervals[J]. Power system technology,2017,41(2):402-408(in Chinese).

[18] 李传奇,崔佳伟,孙策,等. 基于偏秩相关-逐步回归法的SWMM模型全局敏感性分析[J]. 中国农村水利水电,2019(1):51-55.
LI Chuanqi,CUI Jiawei,SUN Ce,et al. Global sensitivity analysis of SWMM model based on partial rank correlation and stepwise regression method[J]. China rural water and hydropower,2019(1):51-55 (in Chinese).

[19] 郝鹏,王博,李刚,等. 基于缺陷敏感性分析的加筋圆柱壳结构设计[J]. 应用力学学报,2013,30(3):344-349.
HAO Peng,WANG Bo,LI Gang,et al. Structural design of stiffened shells based on imperfection sensitivity analysis[J]. Chinese journal of applied mechanics,2013,30(3):344-349(in Chinese).

[20] 方从严,刘宁,卓家寿. 结构可靠度优化的敏感性分析[J]. 应用力学学报,2005,22(1):63-66.
FANG Congyan,LIU Ning,ZHUO Jiashou. Structural reliability optimization with sensitivity analysis[J]. Chinese journal of applied mechanics,2005,22(1):63-66(in Chinese).

(编辑 李坤璐)